

Ku帯衛星通信用 小型・屋外型SSPA

Compact Outdoor Solid-State Power Amplifier for Ku-Band Satellite Communications

望月 亮 桑原 慎一 山田 良男
 ■ MOCHIZUKI Ryo ■ KUWAHARA Shinichi ■ YAMADA Yoshio

東芝は、日本放送協会 (NHK) と共同で、放送局の報道やスポーツなどの中継で用いるKu帯 (12~18GHz) の14.0~14.5GHz帯衛星通信向けに、運用電力80W級では世界最小^(注1)となる屋外型の固体化電力増幅器 (SSPA: Solid State Power Amplifier) を開発した。

この装置は、冷却構造の改良により装置の体積を22.8Lに抑えるとともに、二つのユニットに分割することで、国際航空運送協会 (IATA) 規格に適合する高い可搬性を実現した。また、電界効果トランジスタ (FET) の発熱の傾向が異なる3か所の温度を基に利得補償を行うことで、環境温度の変化やコールドスタート後の急激なFETの温度変化に適応し、高い利得安定度を実現した。

In cooperation with Japan Broadcasting Corporation (NHK), Toshiba has developed the world's smallest 80 W-class 14-14.5 GHz outdoor solid-state power amplifier (SSPA) for Ku-band (12-18 GHz) satellite applications such as news and sports broadcasting systems, which attains a third-order intermodulation distortion (IM3) of -25 dBc.

This SSPA has a total volume of 22.8 L, achieved by improvement of the cooling structure, and can be easily carried by separating the system into two units. In addition, to enhance the gain stability, the SSPA is equipped with an adaptive gain equalizer for attenuator control according to the temperature of each field-effect transistor (FET).

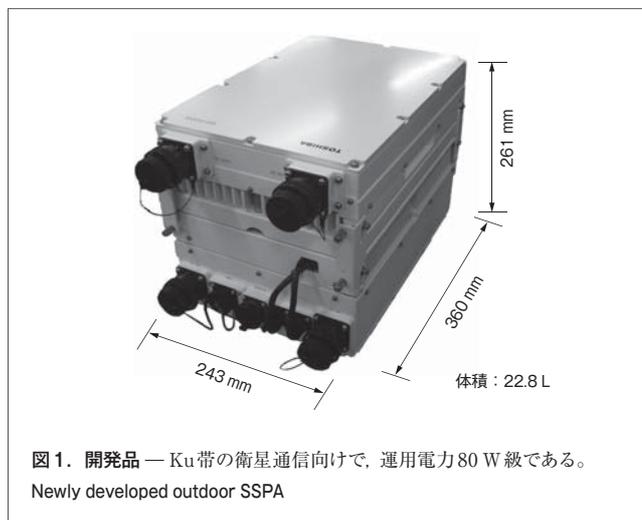
1 まえがき

放送局の報道やスポーツなどの中継で使用される衛星通信は Satellite News Gathering (SNG) と呼ばれ、Ku帯の14.0~14.5GHz帯送信周波数が用いられている。固体化電力増幅器 (SSPA: Solid State Power Amplifier) は、このシステムにおいて通信衛星へ送出する送信波の電力増幅を担っている。

SNGは、高画質な映像素材を伝送する能力が要求されるため、運用電力80W以上の送信が必要とされている。そのため、従来は真空管の一種である進行波管 (TWT) を用いた電力増幅器が使われてきたが、寿命が短く起動時間が長いという欠点があり、固体化が望まれていた。

近年、高周波の電力増幅FETでは、ガリウムヒ素 (GaAs) に比べて高出力化に有利な窒化ガリウム (GaN) が注目されている。東芝は、Ku帯向けに50W級のGaN高電子移動度トランジスタ (HEMT) を開発し⁽¹⁾、この素子を用いた運用電力100W級のSSPAを既に製品化している⁽²⁾。しかし、これはラックマウントに実装する屋内型であったため、屋外・可搬型の報道中継設備として、防塵 (じん)・防水対応や小型化、及び広い温度範囲での利得補償など、機動性に優れた新たなSSPAが要求されていた。これを受けて、当社はNHKと共同

(注1) 2010年3月現在、当社調べ。



で、屋内型100W級SSPAをベースにして、Ku帯の衛星通信向けに、運用電力80W級で世界最小となる屋外型SSPAを開発した。

ここでは、開発した屋外型SSPA (以下、開発品と呼ぶ) の特長と開発課題の解決施策、及びその特性について述べる。

2 開発品の概要

開発品の外観を図1に、主な仕様を表1に示す。外形寸法

表 1. 屋外型 SSPA の主な仕様
Specifications of outdoor SSPA

項目	仕様	
定格運用出力	80 W	
冷却方式	強制空冷	
利得	60 dB以上	
帯域内利得偏差	U/C 非搭載：2.0 dB以下、U/C 搭載：4.0 dB以下	
第2高調波	-60 dBc以下(定格出力時)	
帯域内スプリアス	-65 dBc以下	
三次相互変調積	-25 dBc以下(2波等振幅CW合計出力80 W時)	
周波数帯	U/C 非搭載	入出力：14.0～14.5 GHz
	U/C 搭載	入力：950～1,450 MHz 出力：14.0～14.5 GHz
外形	メインユニット	243×360×145 mm
	電源ユニット	243×360×116 mm
質量	メインユニット	16 kg
	電源ユニット	10 kg
消費電力	1,800 W	
環境性能	周囲温度：-20～55℃	
制御ポート	Web制御/RS-485/パラレル入出力	
備考	オプションでU/Cを内蔵	

U/C：Up Converter

は243(幅)×360(奥行き)×261(高さ)mmであり、体積は22.8Lである。

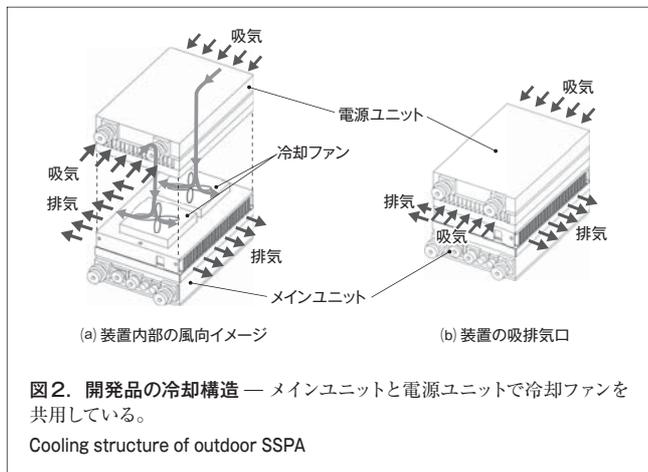
この製品は、可搬性の向上による優れた機動性の実現を目指し、次の2点を主な課題として開発を進めた。

- (1) 防塵・防水対応と小型化の両立
 - (2) 広い動作温度範囲における利得補償の改善
- これらの課題を解決した施策を以下に述べる。

3 小型化

3.1 冷却構造の見直し

電力増幅器を小型化するための主な施策は、冷却能力を落とさずに冷却器を小型化することである。当社の従来の屋内



型増幅器はラックマウント式のため、冷却器側面に冷却ファンを備えており、冷却器の小型化が困難であった。

開発品の冷却構造を図2に示す。電源ユニットと電力増幅部を実装するメインユニットのそれぞれの放熱器を向かい合わせに重ね、その間に共用の冷却ファンを配置する。放熱量の少ない電源ユニットの放熱器は冷却ファンの吸込みで冷却し、放熱量の大きいメインユニットの放熱器は冷却ファンの吐出しで冷却する。この構造により、開発品の体積を22.8Lと大幅に小型化した。

開発品は、メインユニットと電源ユニットに分割して運搬し、報道中継先で組み立てて運用する。これにより、運搬時の外形寸法と質量がIATAの規格に適合し、航空機の受託手荷物として運搬できるようになったことで、機動性が向上した。

3.2 電力増幅部の構造の見直し

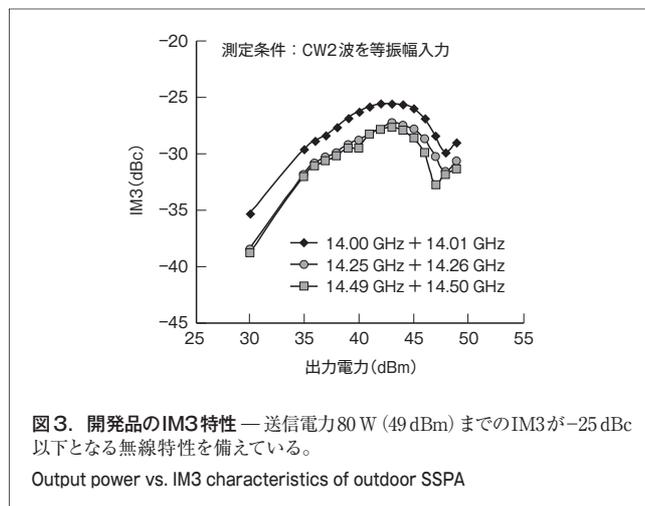
開発品の定格運用電力は80Wであり、この電力での三次相互変調積(IM3: The 3rd Order Intermodulation Distortion)が-25dBc以下となる無線特性を備えている。IM3は、ひずみ特性の重要な指標の一つであり、FETのAM-AM特性(振幅特性)とAM-PM特性(位相特性)の非線形性から生じる。従来の運用電力100W級SSPAは、電力増幅部の最終段で電力合成する当社製のKu帯50W級GaN HEMT8素子とその前段のアイドル電流を調整することで、IM3の振幅成分が極小となる補償条件を成立させ、IM3を改善していた⁽²⁾。

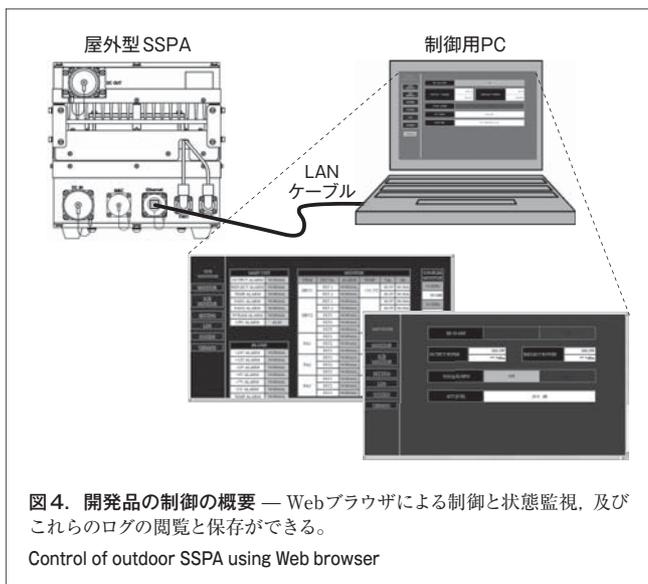
開発品では、この構造を見直し、電力増幅部の最終段を6素子に減らした。14.0～14.5GHzの帯域の周波数3点について、無変調連続波(CW)2波を等振幅に入力した際のIM3特性の測定結果を図3に示す。

3.3 低消費電力化

電力増幅部のFETの削減と電源部の効率改善により装置の発熱量を抑え、消費電力を低減した。

増幅素子を固体化したことで、当社製のTWT電力増幅器に比べて環境への影響と電力効率が改善された。特にCO₂





(二酸化炭素) 排出量は41%削減された^(注2)。

3.4 制御インターフェースの見直し

小型化のためハードスイッチを削除しつつ、図4に示すように、LANを介した制御用PC（パソコン）のWebブラウザによるGUI（Graphical User Interface）を導入し汎用性を考慮した。これにより、装置の制御と状態監視、及びこれらのログの閲覧と保存ができる。また、システムの上流から監視と制御を受けるため、RS-485シリアル通信と平行入出力に対応する。

4 利得温度補償の改善

放送用途のSSPAは動作保証する温度範囲が広いこと、周囲温度の変化に対する利得の安定度の確保が重要になる。また、装置を運搬した先で運用を行うため、コールドスタートからの利得の安定度も重要である。開発品は、従来の運用電力100 W級SSPAと比べてこれらの安定性を改善した、新たな利得温度補償機能を搭載した。

4.1 温度利得変動の原因

周波数が高くなるとFETの線形利得は減少することが知られているが、Ku帯のFETは約6～10 dBの線形利得であり、電力増幅部として必要な利得を得るには、FETをカスケードに接続する必要がある。開発品は、60 dB以上の利得を得るために、GaAs FETとGaN HEMTを12段接続する。装置の温度利得変動量 ΔG は式(1)で示される。

$$\Delta G = a \times \Delta T_c \times X \quad (1)$$

a : FETの利得の温度こう配 (dB/°C)
 ΔT_c : FETのフランジ温度の変化量 (°C)
 X : FETのカスケード段数 (段)

(注2) 当社調べ。

式(1)から利得変動の要因はFETの温度変化にあり、利得変動量はFETの段数分加算される。 ΔT_c は最大で120°Cを超え、 X は12段であることから、 ΔG は21 dB以上となる。このため、利得温度補償を導入し、利得を安定化することが必須である。

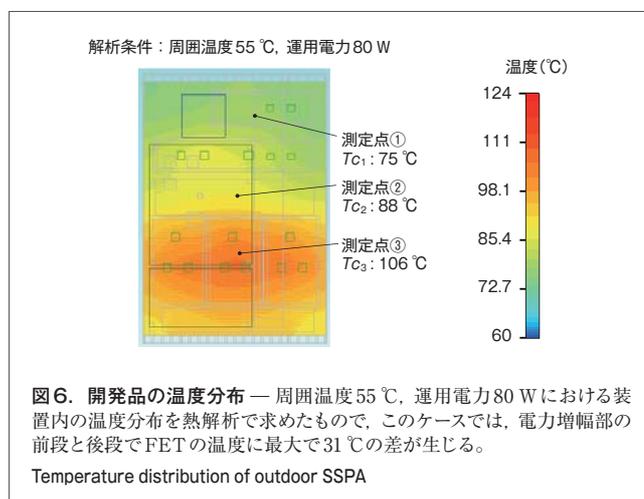
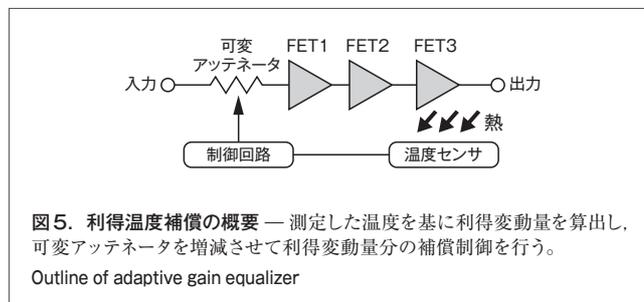
4.2 利得温度補償の方法

利得温度補償は、図5に示すように、温度センサで検出したFET近傍の温度から制御回路が式(1)の ΔG を算出し、電力増幅部前段の可変アッテネータで利得変動量分の補償が行われるよう制御する。補償の精度は、利得変動量の算出の精度と可変アッテネータの温度特性に依存するが、従来の運用電力100 W級SSPAはこれらが不十分であった。

4.3 利得変動量の算出精度向上

温度変化をもたらす要因は、二つに大別される。一つは装置の周囲温度の変化であり、もう一つはFETの発熱量の変化である。FETの発熱量は送信電力によって変わるほか、電力増幅部の前段と後段で異なるため、装置内の温度分布が均一にならないという現象が起こる。

図6は、周囲温度55°C、運用電力80 Wにおける装置内の温度分布を熱解析で求めたものである。このケースでは、電力増幅部の前段と後段でFETの温度に最大で31°Cの差が生じる。従来の運用電力100 W級SSPAでは温度検出を1か所で行っていたが、開発品では、温度分布が不均一であ



ることを考慮して、図6に示す3か所（測定点①～③）の温度を基に ΔG を算出する。式(1)において、温度検出の3か所に応じたFETの段数を割りふると、利得温度補償量 ΔG_{EQ} は、式(2)のように求めることができる。

$$\Delta G_{EQ} = \Delta G_1 + \Delta G_2 + \Delta G_3$$

$$= (a \times \Delta T_{c1} \times X_1) + (a \times \Delta T_{c2} \times X_2) + (a \times \Delta T_{c3} \times X_3) \quad (2)$$

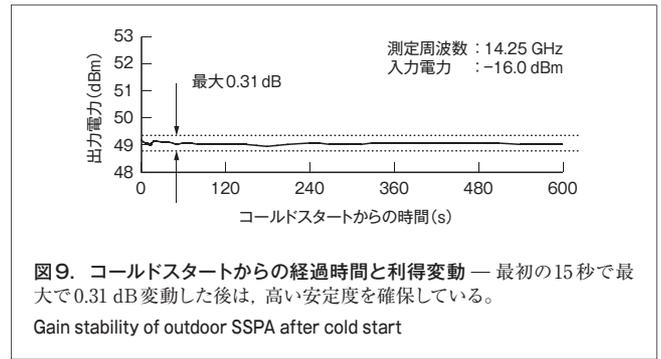
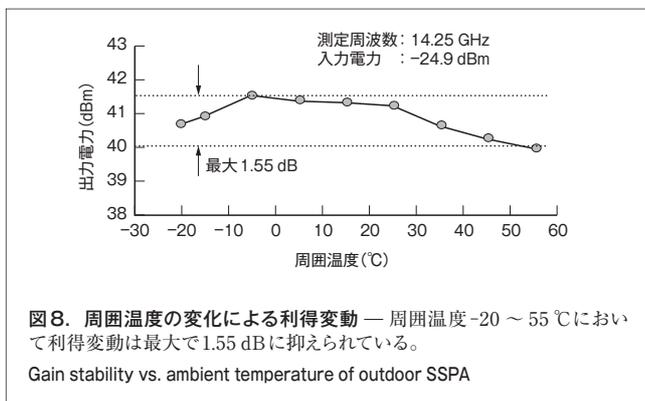
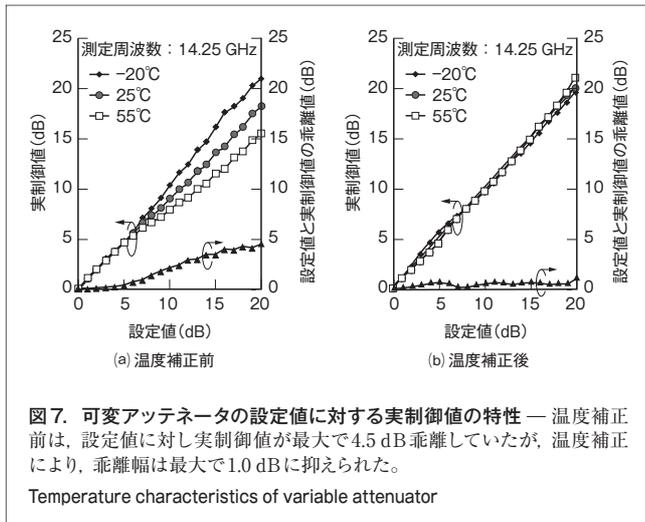
$$X = X_1 + X_2 + X_3$$

4.4 可変アッテネータの温度特性改善

可変アッテネータの実制御値は、設定値に対して温度により変動するため、開発品は、温度に応じて制御値を補正する機能を搭載した。可変アッテネータの設定値に対する実制御値の特性を、温度補正前と補正後を比較して図7に示す。装置の周囲温度が -20°C 、 25°C 、 55°C における可変アッテネータの設定値と実制御値の乖離（かいり）が最大で4.5 dBあったが、補正後は最大で1.0 dBに改善された。

4.5 利得温度補償効果の測定結果

開発品の周囲温度を $-20 \sim 55^\circ\text{C}$ で変化させた際の、利得変動を図8に示す。測定周波数14.25 GHzにおいて、利得変動量は最大で1.55 dBに抑えられている。また、運用電力80 W



におけるコールドスタートからの経過時間と利得変動を図9に示す。最初の15秒で最大0.31 dB変動した後は、高い安定度を確保している。

5 あとがき

NHKと共同で、Ku帯の衛星通信向けに、運用電力80 Wで世界最小となる、体積22.8 Lの屋外型SSPAを開発した。装置を小型化し可搬性を向上させた。また、温度利得変動に対しては、FETの発熱の傾向が異なる3か所の温度を基に利得温度補償を行った。

今後、機動性と環境性に重点を置いて、次世代放送設備の開発を進めていく。

文献

- 高木一考, ほか. Ku帯50 W級GaN HEMT. 東芝レビュー, 63, 5, 2008, p.40-43.
- 望月 亮, ほか. Ku帯衛星中継システム向けGaN FET固体化電力増幅器の開発. 映像学技報, 33, 15, 2009, p.43-48.



望月 亮 MOCHIZUKI Ryo

社会システム社 府中事業所 放送・ネットワークシステム部。
放送機器の設計・開発に従事。映像情報メディア学会会員。
Fuchu Complex



桑原 慎一 KUWAHARA Shinichi

社会システム社 府中事業所 放送・ネットワークシステム部
主務。通信機器の機構の設計・開発に従事。
Fuchu Complex



山田 良男 YAMADA Yoshio

社会システム社 府中事業所 放送・ネットワークシステム部
参事。衛星通信システムの設計・開発に従事。
Fuchu Complex